بررسی تجربی جریان هوا پایین‌دست مدل مربعی در زوایای مختلف*

مقاله کوتاه

احسان اردکانی[۱]   علیرضا تیمورتاش[۲]   محمدعلی اردکانی[۳]

چکیده *با بررسی ریزش گردابه‌ها و جریان هوای پایین‌دست مدل مربعی می‌توان، دبی سنج جریان هوا از نوع گردابه‌ای را طراحی نمود. در این مقاله سرعت جریان هوا، شدّت اغتشاش‌های آن و ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مربعی به ضلع ۱۵ mm به‌صورت تجربی با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که زاویهٔ جریان هوا تأثیر شدیدی بر توزیع سرعت جریان هوا و شدّت اغتشاش‌های آن ندارد ولی تغییرات عدد استروهال نسبت به زاویهٔ جریان بالا است، به‌طوری‌که عدد استروهال در زاویهٔ °۱۲ بیشترین مقدار را معادل ۰/۱۷۶ و در زاویهٔ °۴۳ کمترین مقدار را معادل ۰/۱۲۹ دارا است. درصورتی‌که پراب در ناحیهٔ x/a=۲/۵ و ۲/۲≤y/a≤۶ قرار گیرد، سرعت برابر سرعت جریان آزاد بوده و گردابه‌ها نیز قابل اندازه‌گیری است.*

واژه‌های کلیدی ریزش گردابه‌ها، مدل مربعی، جریان‌سنج سیم‌داغ، دبی سنج گردابه‌ای.

Experimental Investigation on Flow Downstream of a Square Bluff Body at Different Angles

E. Ardekani   A. Teymourtash   M.A. Ardekani

Abstract *Study of vortex shedding and flow downstream of a square bluff body can be used to a vortex flowmeter. In this paper, flow velocity, turbulence intensity and vortex shedding from a 15 mm square bluff body have been investigated experimentally using hot-wire anemometer. Results show that flow angle has little effect on flow velocity distribution and turbulence intensity. However, variations of Strouhal number (St) with respect to the flow angle is large, so that Strouhal number at flow angle of 12° has the maximum value of 0.176 and at angle of 43°, it has the minimum value of 0.129. If the probe is placed in the region x/a=2.5 and 2.2≤y/a≤6, the velocity will be equal to the free stream velocity and the vortices will be measureable.*

Keywords Vortex shedding, square bluff body, Hot-wire anemometer, Vortex flowmeter.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۳/۲۴ و تاریخ پذیرش آن۹۹/۷/۱٤ می‌باشد.

DOI:10.22067/fum-mech.v31i2.81306

(۱) دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۳) استاد، مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران.

Email: ardekani@irost.ir

مقدّمه

پدیدۀ ریزش گردابه‌ها از اجسام لبه پهن (Bluff Body)، از پدیده‌های مهم جریان سیّالات است که شناخت این پدیده اهمّیّت زیادی در سیّالات دارد.

ریزش گردابه‌ها سبب ارتعاش بر روی اجسام پایین‌دست شده و یا آنکه سبب ارتعاش خود جسم می‌شود که این موضوع برای سازه‌هایی که در معرض باد قرار دارند، اهمّیّت دارد. همچنین این موضوع پایه و اساس دبی سنج‌های گردابه‌ای نیز است [1]. با اندازه‌گیری ریزش گردابه‌های ناشی از اجسام لبه پهن می‌توان سرعت و درنتیجه دبی جریان را اندازه‌گیری کرد.

دبی سنج‌های گردابه‌ای از نوع دبی سنج‌های خطی می‌باشند که مزیّت این نوع دبی سنج‌ها دقّت بالا، بازۀ اندازه‌گیری مناسب و قابلیت استفاده در سیّالات مختلف و شرایط گوناگون از لحاظ فشار است. مهم‌ترین خصوصیت این نوع دبی سنج‌ها این است که نیازی به کالیبراسیون مداوم ندارند. در این نوع دبی سنج‌ها، فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه پهن را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از آن، سرعت و یا دبی جریان هوا را می‌توان اندازه‌گیری نمود. بدین منظور نیاز است که رابطۀ عدد استروهال ($St = \frac{fa}{U}$) و عدد رینولدز ($Re = \frac{ua}{\nu}$) برای جسم لبه پهن مشخص شود. a اندازۀ مشخصۀ جسم لبه پهن به‌عنوان‌مثال طول ضلع یک مربع، U سرعت جریان آزاد و ν لزجت سینماتیکی است. شکل جسم لبه پهن و درنتیجه فرکانس آن از اهمّیّت بالایی برخوردار است و تاکنون شکل‌های گوناگونی نظیر مربع، مستطیل، مثلث و T شکل برای این امر پیشنهاد و توسط محققین مختلف بررسی شده است. برای انتخاب جسم لبه پهن، این نکته مهم است که مکان جدایش در جسم، حتی‌المقدور ثابت بوده و با عدد Re تغییر نکند [2].

برای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد، از جمله اندازه‌گیری ارتعاش جسم و یا اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان هوا که مناسب‌ترین روش برای اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان هوا، استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ است [3].

مدل مربعی و یا مستطیلی، جسم لبه پهنی است که بررسی جریان پایین‌دست آن و همچنین بررسی ریزش گردابه‌های آن از اهمّیّت برخوردار بوده که در این راستا تحقیقات مختلفی به‌صورت عددی و تجربی انجام پذیرفته است.

اوکاجیما [4] ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مستطیلی را به‌صورت تجربی با استفاده از تونل باد و تونل آب در اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۰۰۰۰ بررسی نمود. وی نشان داد که عدد استروهال ریزش گردابه‌ها بستگی به نسبت عرض به ارتفاع مدل دارد. همچنین وی نشان داد تغییرات عدد استروهال برای مدل مربعی، در اعداد رینولدز کمتر از ۱۰۰ زیاد بوده و در اعداد رینولدز بالاتر از ۵۰۰۰ تقریباً ثابت بوده و عدد استروهال حدود ۰/۱٤ است. همچنین وی ریزش گردابه‌ها را برای مدل مستطیلی با نسبت ارتفاع به پهنای مدل از ۰/٦ تا ۱۰ را به‌صورت عددی برای اعداد رینولدز کمتر از ۸۰۰ بررسی نمود. وی نشان داد هنگامی‌که نسبت ارتفاع به پهنای مدل ۲/٦ و یا ٦ باشد، تغییرات شدیدی در عدد استروهال ریزش گردابه‌ها رخ می‌دهد.

ناکامورا و همکارانش [5] ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مستطیلی را در اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ به‌صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که مکانیزم ریزش گردابه‌ها بستگی به عدد رینولدز دارد. هنگامی‌که عدد رینولدز کمتر از ۳۰۰ است، ریزش گردابه‌ها از نوع کارمن بوده و اغتشاش‌های سرعت لحظه‌ای جریان بسیار نزدیک به موج سینوسی است. با افزایش عدد رینولدز مکانیزم از نوع ناپایداری در تنش‌های برشی می‌شود.

متسوموتو [6] تأثیر زاویۀ جریان هوا بر ریزش گردابه‌ها برای مدل مستطیلی با نسبت ارتفاع به پهنای ۰/۵ را به‌صورت تجربی بررسی نمود. وی نشان داد که عدد استروهال از مقدار ۰/۱۵ در زاویۀ 0° تا مقدار ۰/۲۱ در زاویۀ 25° افزایش یافته و پس‌ازآن از زاویۀ 25° تا 80° به‌آرامی عدد استروهال کاهش یافته و به ۰/۱۸

می‌رسد.

کلکار و پاتانکار [7] جریان پایین‌دست مدل مربعی شکل را در اعداد رینولدز پایین حدود ۱۰ تا ۱۰۰ را به‌صورت عددی بررسی نمودند. آنها با استفاده از خطوط جریان تفاوت ناحیهٔ جدایش در اعداد رینولدز ۱۰ تا ۱۰۰ را نشان دادند. هنگامی‌که عدد رینولدز ۱۰ است، ناحیهٔ جدایش و گردابه‌های ساکن وجود ندارد، ولی با افزایش عدد رینولدز طول ناحیهٔ جدایش و گردابه‌های ساکن افزایش می‌یابد.

سن و همکارانش [8] جریان پایین‌دست مدل مربعی شکل را در اعداد رینولدز کمتر از ۱۵۰ به‌صورت عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که جدایش جریان در عدد رینولدز ۱/۱۵ اتّفاق می‌افتد. آنها بیان کردند که طول ناحیهٔ جدایش با افزایش عدد رینولدز در بازهٔ ۱/۵ تا ٤۰ به‌طور خطی طبق رابطهٔ $\frac{L}{D} = -۰/۰۷۸۳ + ۰/۷۲٤Re$ افزایش می‌یابد. همچنین آنها عدد استروهال ریزش گردابه‌ها را در بازهٔ رینولدز ٦۰ تا ۱۳۰ به‌صورت $St = ۰/۱۷۷٤ - \frac{۳/۲۲٤۲}{Re}$ ارائه نمودند.

شارما و اسوارانا [9] عدد استروهال برای مدل مربعی شکل در عدد رینولدز ۱۰۰ را ۰/۱٤۸۸ به دست آوردند.

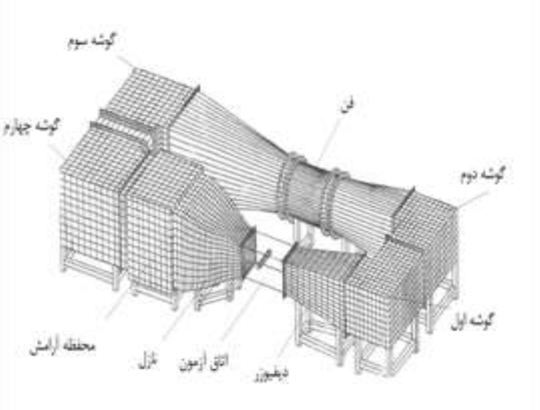
سینگ و همکارانش [10] برای مدل مربعی شکل در عدد رینولدز ۱۰۰ عدد استروهال را در جریانی که زاویهٔ آن صفر است برابر ۰/۱٤۷ به دست آوردند. همچنین ساهو و همکارانش [11]، برای مدل مربعی شکل با همان عدد رینولدز ۱۰۰، عدد استروهال ۰/۱٤۸٦ را به دست آوردند.

ین و یانگ [12] ریزش گردابه‌ها پایین‌دست مدل مربعی شکل را در بازهٔ عدد رینولدز ٤۰۰۰ تا ۳٦۰۰۰ در زوایای مختلف جریان به‌صورت تجربی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که جریان پایین‌دست مدل دارای سه ناحیهٔ لبهٔ جدایش، حباب جدایش و اتصال جریان است. همچنین آنها نشان دادند که زاویهٔ جریان بر فرکانس ریزش گردابه‌ها (عدد استروهال) تأثیر گذاشته و هنگامی‌که زاویهٔ جریان هوا ۰° است، کمترین مقدار عدد استروهال و هنگامی‌که زاویهٔ جریان هوا ۱۵° است بیشترین مقدار عدد استروهال را خواهیم داشت.

در این مقاله، مدل مربعی که از اجسام لبه پهنی است که به زاویهٔ جریان حساس بوده و تغییرات زاویه بر عدد استروهال تأثیرگذار است، به‌طوری‌که زاویهٔ قرارگیری مدل برای کاربردهای مختلف، از اهمّیّت برخورداراست. به‌منظور استفاده در کاربردهای مختلف از جمله در طراحی دبی سنج‌های گردابه‌ای، جریان پایین‌دست مدل مربعی به‌صورت تجربی بررسی و نتایج آن ارائه شده است.

روش آزمایش

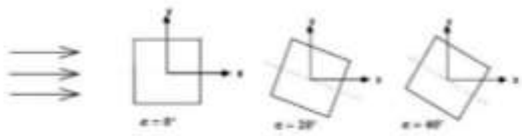
کلّیهٔ آزمایش‌ها در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکدهٔ مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. تونل باد مورد استفاده از نوع مداربسته مطابق شکل (۱) است که سرعت آن با استفاده از کنترل دور از ۲ m/s تا ۲۸ m/s قابل تنظیم است.



شکل (۱): تونل باد مداربسته و قسمت‌های مختلف آن

مقطع اتاق آزمون تونل باد فوق ٦۰cm × ٦۰cm است. به‌منظور یکنواخت نمودن سرعت جریان هوا و کاهش اغتشاش‌های آن از ٤ سری توری با مش ۲۰ و ۲٤ در اتاق آرامش، به همراه لانه‌زنبوری استفاده شده است. مقدار شدّت اغتشاش‌های تونل باد در مرکز اتاق آزمون کمتر از ۰/۲٪ است. مدل مورد استفاده در این تحقیق به شکل مربع به ضلع ۱۵mm است. شکل (۲)

محور مختصات و زاویهٔ چرخش مدل را نشان می‌دهد.



شکل (۲): محور مختصات و زاویهٔ چرخش مدل

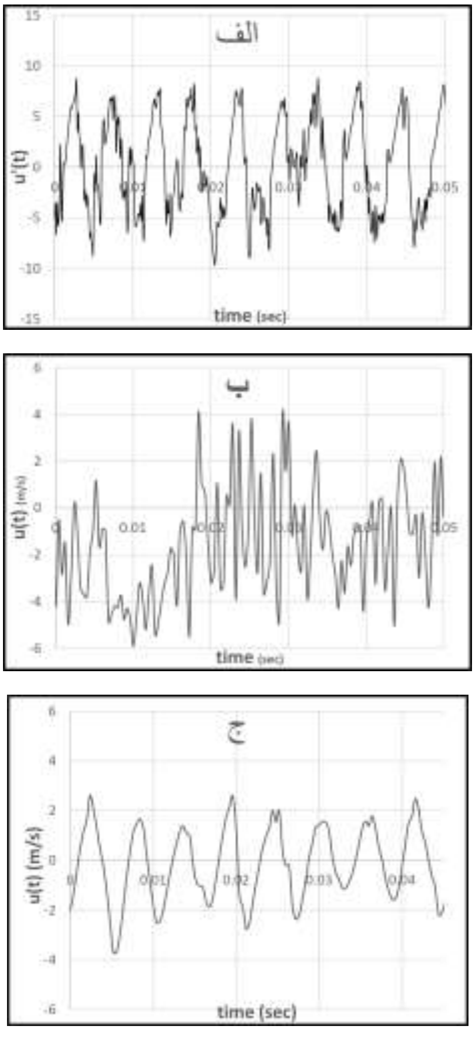
جریان پایین‌دست مدل با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فراسنجش صبا اندازه‌گیری شده است که پراب مورد استفاده از نوع یک‌بعدی است. سیم پراب از نوع تنگستن با قطر ۵ میکرون است. به‌منظور جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقّت جابه‌جایی ۰/۱ mm در سه بعد است که با استفاده از رایانه حرکت آن قابل کنترل است. داده‌های اخذشده توسط جریان‌سنج سیم‌داغ از طریق کارت اخذ داده از نوع NI به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار Flow Ware تجزیه‌وتحلیل می‌شود. به‌منظور تغییر زاویهٔ مدل از موتور پله‌ای استفاده می‌شود که از طریق رایانه حرکت دورانی آن قابل کنترل است. میزان دوران موتور پله‌ای به ازای هر پالس $0/72^{\circ}$ است. برای کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ و اندازه‌گیری سرعت آزاد بالادست مدل از لولهٔ استاتیکی پیتوت به همراه فشارسنج Omega استفاده شده است.

در این تحقیق در ابتدا مدل را در زاویهٔ صفر درجه قرار داده و با استفاده از مکانیزم جابه‌جایی محل مناسبی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها به‌وضوح دیده می‌شود را مشخص نموده و سپس فرکانس ریزش گردابه‌ها در سرعت‌های مختلف و زاویه‌های مختلف در فاصله‌های x/a= ۱،۱/۲،۵/۵ پایین‌دست مدل اندازه‌گیری می‌شود.

بررسی نتایج

بررسی ریزش گردابه‌ها. همان‌گونه که بیان شد به‌منظور اندازه‌گیری ریزش گردابه‌ها، نیاز است که پراب جریان‌سنج سیم‌داغ در مکان مناسب از مدل قرار گیرد. شکل (۳-الف) اسیلگرام سرعت لحظه‌ای جریان را در فاصلهٔ (x/a=۲/۵،y/a=۲/۵) از مدل و شکل (۳-ب) اسیلگرام سرعت لحظه‌ای جریان در فاصلهٔ (x/a=۲/۵،y/a=۰/۵) را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۳-الف) اسیلگرام سرعت لحظه‌ای نزدیک به موج سینوسی است که دارای نوسانات است، لذا در این نقطه پدیده ریزش گردابه‌ها قابل مشاهده است.

هنگامی‌که y/a=۰/۵ است (شکل ۳-ب)، اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای در ناحیهٔ دنباله مدل بوده که در این حالت اسیلگرام سرعت لحظه‌ای به حالت سینوسی و یا نزدیک به آن نیست، لذا در این نقطه نمی‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را اندازه‌گیری نمود.



شکل (۳): اسیلگرام سرعت لحظه‌ای U= ۲۰ m/s، x/a=۲/۵، الف: y/a=۲/۵، ب: y/a=۰/۵ ، ج: استوانه

شکل (۳-ج) اسیلگرام سرعت لحظه‌ای پایین‌دست استوانه به قطر ۱۰ mm را در عدد Re=۱۱۱۱۰ نشان می‌دهد که مطابق این شکل اسیلگرام سرعت لحظه‌ای نزدیک به موج سینوسی و بدون نوسانات است.

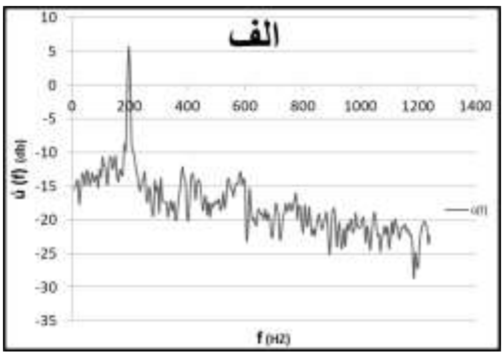
برای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها از دو روش می‌توان استفاده نمود: ۱- شمارش قلّه‌های موج سینوسی در واحد زمان ۲- استفاده از روش FFT.

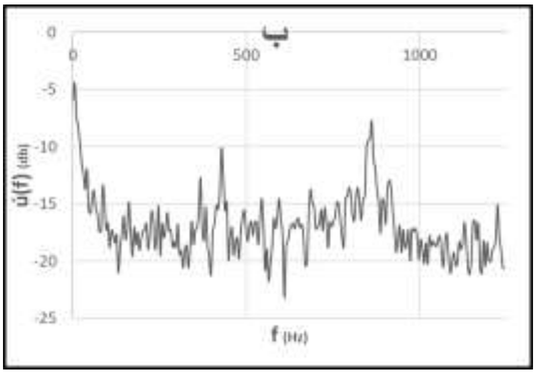
لازم به یادآوری است اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها با استفاده از روش شمارش قله‌ها در مدل مربعی ممکن نبوده و نمی‌توان مدارات الکتریکی دبی سنج را بر این اساس طراحی نمود.

با استفاده از FFT سرعت لحظه‌ای از حوزهٔ زمان به حوزهٔ فرکانس تبدیل می‌شود. در تبدیل سرعت لحظه‌ای از حوزهٔ زمان به حوزه فرکانس اصل نایکویست نیز رعایت شده است. به‌عبارت‌دیگر، فرکانس داده‌برداری، $f = 2 f_m$ که f_m فرکانس ماکزیمم است.

شکل (٤) سرعت لحظه‌ای در حوزهٔ فرکانس را نشان می‌دهد. مطابق شکل (٤-الف)، سرعت لحظه‌ای دارای فرکانس غالب ۲۰۰ Hz بوده که به‌وضوح و قدرت بیشتر دیده می‌شود. این فرکانس غالب همان فرکانس ریزش گردابه‌ها است.

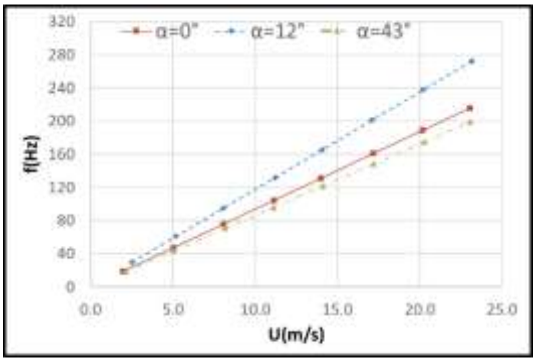
در شکل (٤-ب) فرکانس غالب به‌وضوح دیده نمی‌شود و اغتشاش‌های جریان در فرکانس‌های کمتر است. لذا در این موقعیت، اغتشاش‌های ناشی از دنبالهٔ حاکم است. با توجّه به شکل (٤-الف) فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مربعی را می‌توان با استفاده از روش FFT اندازه‌گیری نمود.





شکل (٤): سرعت لحظه‌ای در حوزه فرکانس
U=۲۰ m/s، x/a=۲/۵، الف: y/a=۲/۵ و ب: y/a=۰/۵

شکل (۵) فرکانس ریزش گردابه‌ها را بر حسب سرعت در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، رابطهٔ فرکانس ریزش گردابه‌ها و سرعت جریان هوا به‌صورت خطی است. شیب این خطوط با زاویهٔ جریان تغییر کرده است.

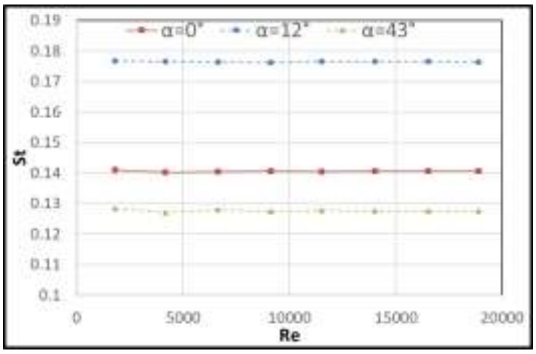


شکل (۵): فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت جریان هوا در زاویه‌های مختلف

مطابق شکل (۵) شیب فرکانس ریزش گردابه‌ها در زاویهٔ ۱۲° بیشتر از دو زاویهٔ دیگر است. به‌منظور بررسی بهتر شکل (۵)، ریزش گردابه‌ها باید بی‌بعد شوند. بدین منظور با استفاده از عدد استروهال، فرکانس ریزش گردابه‌ها و با استفاده از عدد رینولدز، سرعت جریان هوا بی‌بعد شده است.

شکل (٦) منحنی St-Re را برای مدل در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل (٦) عدد استروهال برای اعداد ریتولدز فوق ثابت بوده که این موضوع در

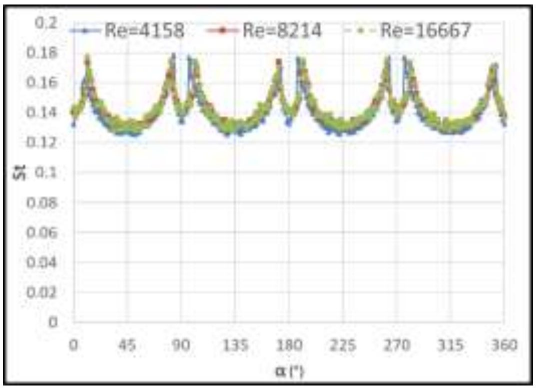
دبی سنج‌ها از اهمّیّت برخوردار است. عدد استروهال با زاویهٔ جریان تغییر کرده ولیکن با عدد رینولدز ثابت است.



شکل (٦): منحنی تغییرات عدد استروهال بر حسب عدد رینولدز در زاویه‌های مختلف

هنگامی‌که عدد استروهال بیشتر باشد فرکانس ریزش گردابه‌ها در سرعت ثابت بیشتر و درنتیجه دقّت اندازه‌گیری آن بهتر می‌شود، ولی در این حالت پاسخ فرکانسی دستگاه اندازه‌گیر می‌بایست کوتاه‌تر شود.

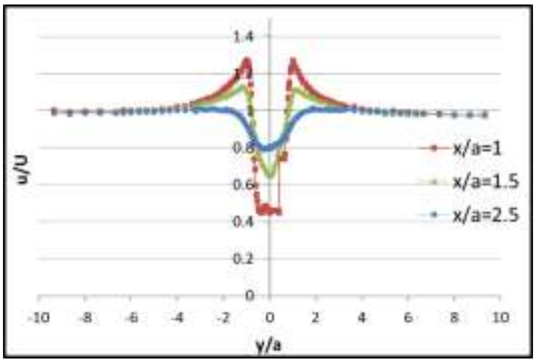
بررسی تأثیر زاویه مدل بر ریزش گردابه‌ها. شکل (٥) تغییرات فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت جریان هوا در زاویه‌های مختلف مدل را نشان می‌دهد که به‌صورت خطی است. مطابق شکل (٥) شیب خطوط با زاویهٔ مدل تغییر می‌کند. به‌منظور بررسی بهتر، شکل (٧) تغییرات عدد استروهال برحسب زاویهٔ مدل در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (٧): منحنی تغییرات عدد استروهال بر حسب زاویهٔ چرخش مدل مربعی در اعداد رینولدز مختلف

مطابق شکل (٧) منحنی‌های St-α در اعداد رینولدز مختلف بر روی یکدیگر منطبق می‌باشند. همان‌گونه که در شکل (٧) نشان داده شده است، تغییرات St-α برای هر °٩٠ تکرار شده است و در هر تکرار نیز با یکدیگر تقارن دارند. کمترین مقدار عدد استروهال ٠/١٢٩ بوده و در زاویه °٤٣ رخ می‌دهد و بیشترین مقدار عدد استروهال ٠/١٧٦ بوده و در زاویه‌های °١٢ و °٨٢ اتّفاق می‌افتد، همچنین منحنی فوق نیز دارای مقدار کمینهٔ نسبی در زاویهٔ °٩٠ است و این زاویه‌ها با دورهٔ تناوب °٩٠ تکرار می‌شوند. با توجّه به شکل (٧) تغییرات در ناحیه کمینه، با زاویهٔ جریان زیاد نبوده، لذا قرار دادن مدل در این زاویه برای طراحی دبی سنج مناسب است.

بررسی جریان پایین‌دست مدل. به‌منظور بررسی مناسب‌تر ریزش گردابه‌ها، جریان در نزدیکی و پایین‌دست مدل در زاویه‌های حساس بررسی شد. شکل (٨) توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان هوا در عرض مدل در فواصل مختلف در زاویهٔ صفر درجه را نشان می‌دهد. سرعت محلّی جریان هوا با استفاده از سرعت آزاد بی‌بعد شده است.



شکل (٨): منحنی توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان هوا در پایین‌دست مدل در زاویهٔ °٠ در فواصل مختلف در عدد Re= ١٦٦٦٧

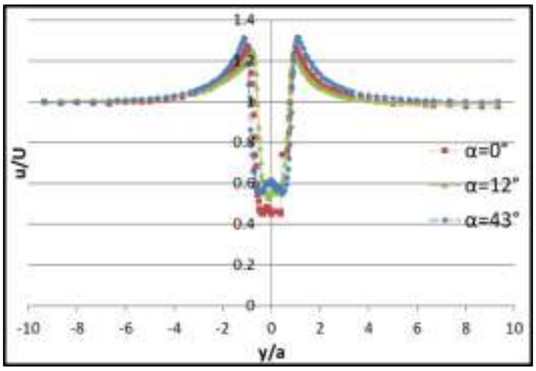
مطابق شکل (٨) در فاصلهٔ x/a=١، در فواصل y/a=±١ سرعت جریان هوا حدود ٢٧٪ بیشتر از سرعت جریان آزاد است. با افزایش فاصله به پایین‌دست، این مقدار کاهش یافته و در x/a=٢/٥ تقریباً سرعت محلّی

جریان هوا از سرعت آزاد بیشتر نخواهد بود. همچنین با افزایش فاصله به سمت پایین‌دست، کمینهٔ سرعت محلّی افزایش یافته و پهنای ناحیه دنباله افزایش می‌یابد.

در فاصلهٔ x/a=۱ کمترین سرعت در ناحیهٔ دنباله برابر ۰/۴۵ سرعت جریان آزاد و در فاصلهٔ x/a=۲/۵ برابر ۰/۷۹ سرعت جریان آزاد است. همچنین پهنای ناحیهٔ دنباله در x/a=۱، ۱/۷a و در x/a=۲/۵ برابر ۳/۲a است.

با توجّه به شکل (۷) مقدار بیشترین عدد استروهال در زاویه °۱۲ و کمترین آن در زاویهٔ °۴۳ رخ می‌دهد. لذا در این دو زاویه، سرعت جریان هوا نیز بررسی می‌شود.

شکل (۹) توزیع سرعت جریان هوا را پایین‌دست مدل در زاویه‌های °۰، °۱۲ و °۴۳ نشان می‌دهد.

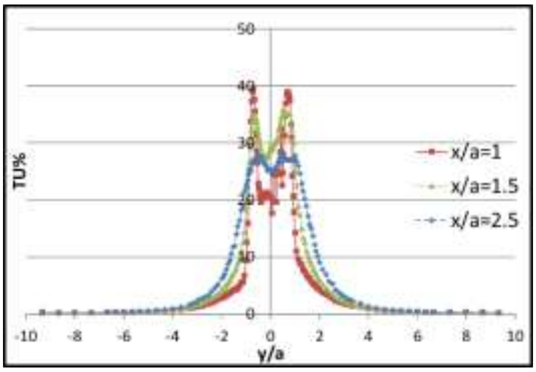


شکل (۹): منحنی توزیع سرعت جریان هوا در زوایای مختلف در x/a=۱ در عدد Re=۱۶۶۶۷

مطابق شکل بالا هنگامی‌که زاویهٔ °۰ و °۱۲ است، توزیع سرعت مشابه بوده ولی هنگامی‌که زاویهٔ °۴۳ است، مقدار نسبت سرعت محلّی به‌سرعت آزاد در فواصل y/a=±۱/۲ حدود ۱/۳۰ خواهد بود که بیشتر از حالت °۰ است. عمق ناحیهٔ دنباله برای مدل مربعی در زاویهٔ °۰ بیشتر بوده ولی پهنای دنباله در زاویهٔ °۴۳ بیشتر از زاویهٔ °۰ است.

شکل (۱۰) توزیع شدّت اغتشاش‌های جریان هوا پایین‌دست مدل مربعی در زاویهٔ °۰ را نشان می‌دهد. شدّت اغتشاش‌ها با رابطهٔ (۱) بیان می‌شود.

$$\%TU = \frac{\sqrt{\bar{u}^2}}{U}.100 \qquad (۱)$$

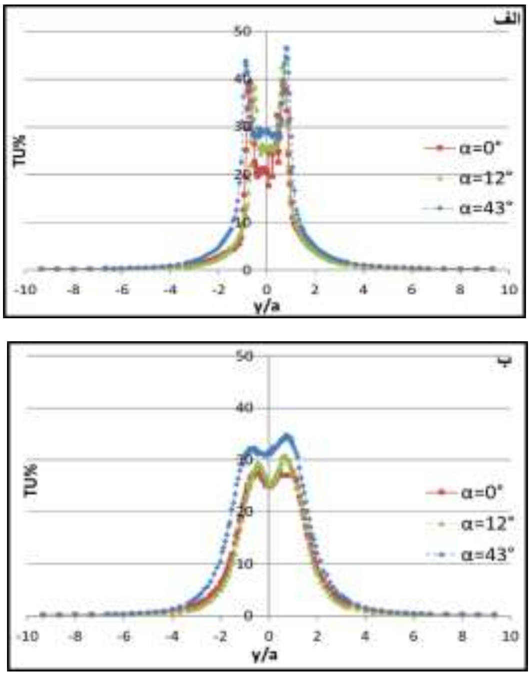


شکل (۱۰): منحنی توزیع شدّت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست مدل مربعی برای زاویهٔ°۰ در فواصل مختلف در عدد Re= ۱۶۶۶۷

هنگامی‌که x/a=۱ است، شدّت اغتشاش‌ها در نزدیکی مدل حدود ۴۰٪ بوده و دارای دو مقدار بیشینه محلّی در فاصله y/a=±۰/۷۳ است. با افزایش فاصله از مدل شدّت اغتشاش‌ها کاهش یافته و به‌تدریج دو مقدار بیشینه محو و تبدیل به یک مقدار بیشینه در مرکز می‌شود.

با توجّه به مرجع [۱۳] هنگامی‌که شدّت اغتشاش‌ها ۳۰٪ است، مقدار خطا در اندازه‌گیری سرعت با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ حدود ۴٪ است. هنگامی‌که شدّت اغتشاش‌ها کمتر از ۶٪ باشد، این خطا ناچیز خواهد بود. اردکانی [۱۴] نشان داد که $۰/۹۹\leq\frac{u}{U}\leq۱/۰۱$ و ناحیه‌ای که شدّت اغتشاش‌ها بین ۱٪≤Tu≤۶٪ باشد، محل مناسب قرارگیری پراب جریان‌سنج سیم‌داغ برای کالیبراسیون در سرعت‌های کم با استفاده از اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها است. با توجّه به شکل (۱۰)، هنگامی‌که y/a≥۲/۵ و یا y/a≤−۲/۵ باشد، این امر محقّق می‌شود.

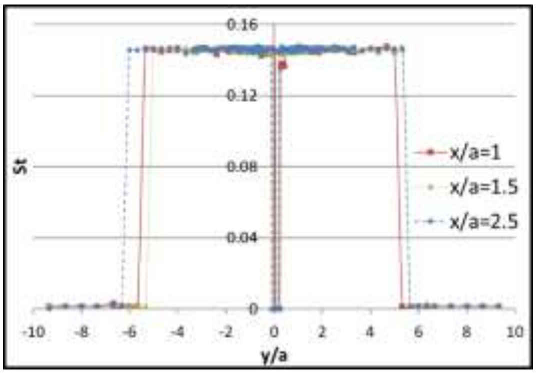
شکل (۱۱–الف)، توزیع شدّت اغتشاش‌ها را برای مدل مربع در زاویه‌های °۰، °۱۲ (بیشترین عدد استروهال) و °۴۳ (کمترین عدد استروهال) در فاصلهٔ x/a=۱ و شکل (۱۱–ب) در فاصلهٔ x/a=۲/۵ نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): منحنی توزیع شدّت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست مدل مربعی در زوایای مختلف الف: x/a=۱ ب: x/a=۲/۵ در عدد Re= ۱٦٦٦٧

هنگامی‌که x/a=۱ است، شدّت اغتشاش‌های ناشی از مدل دارای دو مقدار بیشینه بوده که این مقادیر در زاویهٔ °٤۳ بیشترین و همچنین دارای فاصله بیشتری نسبت به یکدیگر می‌باشند. با افزایش فاصله از مدل مقدار بیشینه شدّت اغتشاش‌ها کاهش می‌یابد. همچنین همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، هنگامی‌که زاویهٔ مدل °٤۳ است، توزیع شدّت اغتشاش‌ها پهن‌تر است که ناشی از پهن‌تر شدن سطح مقطع مدل در برابر جریان است. به‌منظور تشخیص مکان‌هایی که در آن ریزش گردابه‌ها اتّفاق می‌افتد، منحنی تغییرات عدد استروهال در فواصل مختلف پایین‌دست مدل برای زاویهٔ °۰ در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

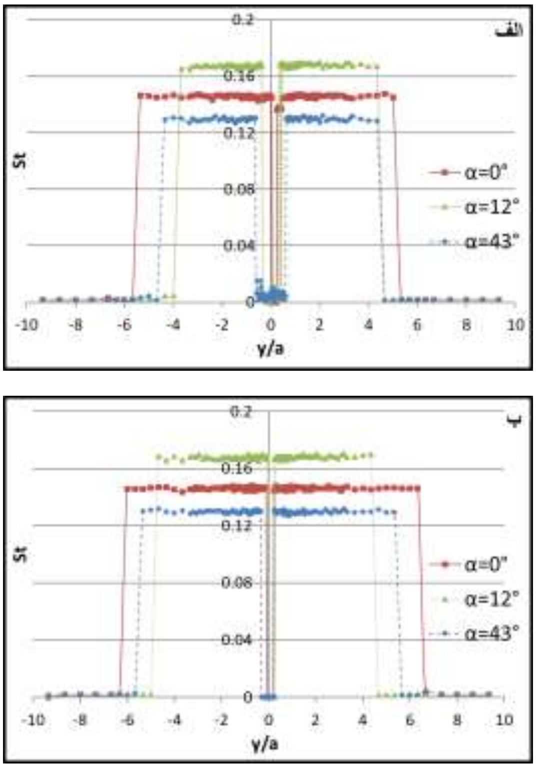
هنگامی‌که x/a=۱ و یا x/a=۱/۵ است، در فاصلهٔ ۰/۳≤y/a≤۵ و ۵-≤y/a≤۰/۳- عدد استروهال برابر ۰/۱٤ بوده و به‌عبارت‌دیگر فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری است. با افزایش فاصله از مدل در x/a=۲/۵، این ناحیه ۰/۳≤y/a≤٦ و ٦-≤y/a≤۰/۳- خواهد بود که مقداری بزرگ‌تر شده است.



شکل (۱۲): منحنی تغییرات عدد استروهال در پایین‌دست مدل مربعی برای زاویهٔ°۰ در فواصل مختلف در عدد Re= ۱٦٦٦٧

شکل (۱۳-الف)، منحنی تغییرات عدد استروهال پایین‌دست مدل و در عرض آن را برای زاویه‌های °۰، °۱۲ و °٤۳ در فاصلهٔ x/a=۱ نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۳-الف) هنگامی‌که زاویه مدل از °۰ به °۱۲ تغییر می‌کند، عدد استروهال بزرگ‌تر شده ولی ناحیه‌هایی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری است به مقدار ۰/٤≤y/a≤٤/۳ و ۳/٦-≤y/a≤۰/۵- کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر زاویهٔ مدل به °٤۳، عدد استروهال کوچک‌تر شده و ناحیه‌هایی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری نیز است، کاهش یافته و به ناحیه ۰/۷≤y/a≤٤ و ٤/۳-≤y/a≤۰/۸- محدود می‌شود.

شکل (۱۳-ب)، منحنی تغییرات عدد استروهال پایین‌دست مدل و در عرض آن را برای زاویه‌های °۰، °۱۲ و °٤۳ در فاصلهٔ x/a=۲/۵ را نشان می‌دهد. تغییرات عدد استروهال همانند حالت x/a=۱ است با این تفاوت که ناحیه‌هایی که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری است برای زاویهٔ °۰ به مقدار ۰/۲≤y/a≤٦/۵ و ٦/۵-≤y/a≤۰/۲-، برای زاویهٔ °۱۲ به مقدار ۰/۲≤y/a≤٤/۳۳ و ٤/٦٦-≤y/a≤۰/۱۲- و برای زاویهٔ °٤۳ به مقدار ۰/۳≤y/a≤۵/۷ و ۵/۵-≤y/a≤۰/۲۳- است.



شکل (۱۳): منحنی تغییرات عدد استروهال در پایین‌دست مدل مربعی در زوایای مختلف الف: x/a=۱ ب: x/a=۲/۵ در عدد Re= ۱۶۶۶۷

نتیجه‌گیری

بررسی و شناخت جریان پایین‌دست مدل مربعی دارای اهمیّت در مکانیک سیّالات بوده و می‌تواند دارای کاربردهایی در ساخت دبی سنج داشته باشد. در این مقاله، جریان پایین‌دست مدل مربعی به‌صورت تجربی بررسی شده و نتایج آن به‌صورت خلاصه به شرح زیر است:

- ریزش گردابه‌ها، در پایین‌دست مدل با استفاده از روش FFT قابل اندازه‌گیری است که با توجّه به این‌که اسیلگرام سرعت لحظه‌ای علاوه بر فرکانس حاکم دارای نوسان است، نمی‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را از طریق شمارش قلّه‌ها اندازه‌گیری نمود. نتایج نشان می‌دهد که عدد استروهال ریزش گردابه‌ها مستقل از عدد رینولدز در بازهٔ ۱۵۰۰ الی ۱۹۰۰۰ است و در زاویهٔ °۰ برابر ۰/۱۴ است.
- عدد استروهال وابسته به زاویهٔ جریان هوا نسبت به مدل است، در زاویهٔ °۱۲، عدد استروهال بیشترین مقدار خود (۰/۱۷۶) را دارا بوده و در زاویهٔ °۴۳ کمترین مقدار خود (۰/۱۲۹) را دارا است.
- پروفیل سرعت در پایین‌دست مدل در زاویه‌های مختلف تقریباً مشابه بوده و در نزدیکی مدل علاوه بر ناحیهٔ دنباله، ناحیه‌ای وجود دارد که سرعت محلّی نسبت به‌سرعت آزاد بیشتر است. هنگامی‌که x/a=۱ است، سرعت جریان در فاصلهٔ y/a≥۳/۲ یا y/a≤-۳/۲ برابر سرعت جریان آزاد است، ولی هنگامی‌که x/a=۲/۵ است، در فاصلهٔ y/a≥۱/۵ یا y/a≤-۱/۵ سرعت جریان برابر سرعت جریان آزاد خواهد شد.
- توزیع شدّت اغتشاش‌های جریان هوا نشان می‌دهد که در زاویهٔ °۰، شدّت اغتشاش‌ها تا حدود ۴۰٪ نیز افزایش می‌یابد. همچنین شدّت اغتشاش‌ها متقارن است، ولی با افزایش فاصلهٔ عرضی این مقدار به‌شدّت کاهش می‌یابد. هنگامی‌که y/a≥۲/۲ یا y/a≤-۲/۲ شدّت اغتشاش‌ها کمتر از ۶٪ خواهد بود.
- توزیع عدد استروهال نیز نسبت به محور مختصات متقارن بوده و برای حالتی که زاویهٔ جریان °۰ است در فاصلهٔ ۰/۳≤y/a≤۶ ثابت است و به‌عبارت‌دیگر فرکانس ریزش گردابه‌ها قابل اندازه‌گیری است. هنگامی‌که زاویه مدل °۱۲(بیشترین عدد استروهال) و یا مدل در زاویهٔ°۴۳ (کمترین عدد استروهال) باشد ریزش گردابه‌ها در فاصلهٔ کمتری قابل مشاهده است.
- برای طراحی و ساخت دبی سنج گردابه‌ای می‌توان از مدل مربعی در زاویهٔ °۴۳ استفاده نمود. در این زاویه فرکانس ریزش گردابه‌ها نسبت به زاویهٔ جریان حساسیت کمتری دارد.

فهرست علائم

St	عدد استروهال

Re	عدد رینولدز	f_m	فرکانس دارای بیشترین دامنه
a	طول ضلع مدل مربعی	%TU	درصد شدّت اغتشاش‌ها
f	فرکانس ریزش گردابه ها	ú	اغتشاش‌های طولی جریان هوا
ν	لزجت سینماتیکی	u	سرعت محلی جریان
x	فاصله از مبدأ مختصات مدل در جهت جریان	U	سرعت جریان آزاد
y	فاصله از مبدأ مختصات مدل در جهت عمود بر جریان	α	زاویهٔ جریان با مدل مربعی

مراجع

1.Ardekani M. A, "Air flow measurement in experimental fluid mechanics", *Iranian Research Organization on Science and Technology*, Tehran, (2014).

2. Miller, R.W. "Flow measurement engineering handbook", *the University of Michigan*, United States, (1983).

3. Ardekani M. A, "Hot-Wire Anemometer", *Iranian Research Organization on Science and Technology*, Tehran, (2006).

4. Okajima, A. "Strouhal numbers of rectangular cylinders", *Journal of Fluid Mechanics*, No123, pp. 379-398, (1982).

5. Nakamura, Y. and Ohya, Y. and Ozono, S. and Nakayama, R. "Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers 200-10^3", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 65, No 1-3, pp. 301-308, (1996).

6. Matsumoto, M. "Vortex shedding of bluff bodies: a review", *Journal of Fluids and Structures*, Vol 13, No 7-8, pp. 791-811, (1999).

7. Kelkar, K.M. and Patankar, S.V. "Numerical prediction of vortex shedding behind a square cylinder", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol 14, No 3, pp. 327-341, (1992).

8. Sen, S. and Mittal, S. and Biswas, G. "Flow past a square cylinder at low Reynolds numbers", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol 67, No 9, pp. 1160-1174, (2011).

9. Sharma, A. and Eswaran, V. "Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime", *Numerical Heat Transfer*, Part A: Applications, Vol 45, No 3, pp. 247-269, (2004).

10. Singh, A. and De, A. and Carpenter, V. and Eswaran, V. and Muralidhar, K. "Flow past a transversely oscillating square cylinder in free stream at low Reynolds numbers", *International Journal for NumericalMethods in Fluids*, Vol 61, No 6, pp. 658-682, (2009).

11. Sahu, A.K. and Chhabra, R. and Eswaran, V. "Two-dimensional unsteady laminar flow of a power law fluid across a square cylinder", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol 160, No 2-3, pp. 157-

167, (2009).

12. Yen, S.C. and Yang, C.W. "Flow patterns and vortex shedding behavior behind a square cylinder", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 99, No 8, pp. 868-878, (2011).
13. Swaminathan, M. and Rankin, G. and Sridhar, K. "A note on the response equations for hot-wire anemometry", *ASME*, *Transactions*, *Journal of Fluids Engineering,* Vol. 108, p. 115-118, (1986).
14. Ardekani, M. "Hot-wire calibration using vortex shedding", *Measurement*, Vol 42, No 5, pp. 722-729, (2009).